

Висновки

1. Розроблено методику відновлення ФРТ змазування із зображень без використання відомостей про характер вібрацій за допомогою дискретного вейвлет-перетворення, базис якого узгоджений з імпульсним відгуком системи.
2. Покращено алгоритм відновлення зображень шляхом введення методики отримання дійсної ФРТ змазування
3. На основі моделювання перевірено дієвість описаного алгоритму
4. У подальшому можливим є дослідження застосування даної методики безпосередньо у системах попередньої обробки зображень

Література

1. Сойфер В. А. Методы компьютерной обработки изображений (2-е изд.), – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
2. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 412 с.
3. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений. – М.: Мир, 1989. - 336 с.
4. Захарченко В.С., Колобродов В.Г. Розробка універсальних вейвлет-базисів для задач підвищення якості зображення. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2008. – Вип. 36. – С. 20-24.

Захарченко В.С., Колобродов В.Г. Метод восстановления изображений искаженных вибрациями Исследована возможность применения математического аппарата вейвлет преобразования для восстановления изображений искаженных вибрациями антисимметричной составляющей звуковой волны, намного меньшей симметричной.	Zakharchenko V.S., Kolobrodov V.G. Method for Image Deblurring The possibility of application of wavelet transform in image processing had been investigated. The new computer assisted method of image deblurring had been developed.
---	--

*Надійшло до редакції
15 червня 2009 року*

УДК 535.24, 628.9

ШИРОКОДІАПАЗОННИЙ СПЕКТРОКОМПАРАТОР

Міхеєнко Л.А., Білінська І.Ю., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

Запропоновано схему широкодіапазонного спектрокомпаратора на базі оригінального ослаблювача оптичного випромінювання для прецизійної радіометрії. Розроблено модель спектрокомпаратора, проаналізовані основні похибки, надані рекомендації щодо їх мінімізації і вибору елементної бази

Вступ

Однією з основних проблем прецизійних оптичних вимірювань є компарування потоку випромінювання від еталонних і робочих випромінювачів. Особливо гостро ця проблема проявляється при енергетичному калібруванні оптичноелект-

ронних пристроїв космічного базування, оскільки різниця між порівняними фотометричними величинами досягає декілька порядків [1,2]. У зв'язку з тим, що при такому калібруванні зазвичай передається одиниця спектральної щільності енергетичної яскравості, виникають додаткові труднощі виконання точного позиціонування випромінювачів, що порівнюються, по відношенню до компаратора та робота останнього в широкому спектральному діапазоні [2]. Існуючі спектрокомпаратори повністю перерахованим умовам не задовольняють [2,3], у зв'язку з чим виникає задача розробки пристрою, що працює в широких динамічному та спектральному діапазонах яскравостей, які порівнюються, і не потребує точного позиціонування еталонного і робочого випромінювачів відносно вхідної апертури спектрокомпаратора. Рішенню цих задач і присвячена ця робота.

Функціональна схема спектрокомпаратора

Функціональна схема запропонована авторами широкодіапазонного спектрокомпаратора показана на рис. 1. Вона складається з оптичного ослаблювача, на вхідну апертуру якого поступає компаруюче випромінювання, монохроматора, що відокремлює необхідну ділянку спектру випромінювання на заданій довжині хвилі і підключений до вихідної апертури ослаблювача, приймача випромінювання, встановлений на виході монохроматора і підсилювально - реєструючого пристрою, що підсилює і реєструє сигнал від приймача випромінювання.

Оптичний ослаблювач має дві інтегруючі сфери, між якими встановлена калібруюча діафрагма змінного перетину. Змінюючи площу перетину діафрагми, можна змінювати величину потоку, що потрапляє з первинної сфери до вторинної, і, тим самим, змінювати коефіцієнт пропускання ослаблювача у широких межах.

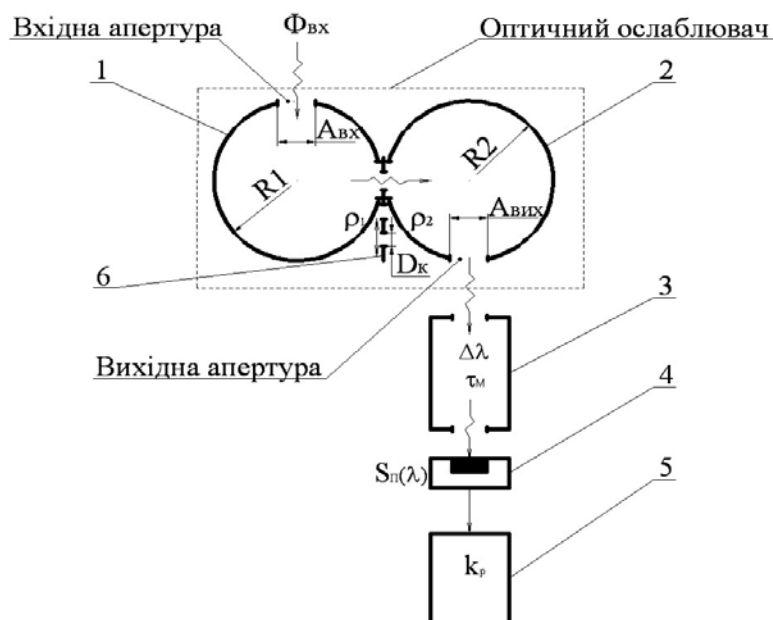


Рис. 1. Широкодіапазонний спектрокомпаратор, де: 1 – перша інтегруюча сфера; 2 – друга інтегруюча сфера; 3 – монохроматор; 4 – приймач випромінювання; 5 – підсилювально-реєструючий пристрій; 6 – калібруюча діафрагма

Очевидно, що використання інтегруючих сфер не потребує точного позиціонування випромінювачів або їх зображень відносно вхідної апертури ослаблювача. Достатньо, щоб випромінювання потрапляло в середину інтегруючої сфери. Аналогічно не потрібне точне позиціонування монохроматора відносно вихідної апертури, що також підвищує точність всього пристрою і спрощує його конструкцію. Крім цього компаратор не критичний до розмірів випромінювачів, що порівнюються і розмірів вхідної щілини монохроматора, які можуть змінюватись в широких межах.

Інтегральний сигнал на виході спектрокомпаратора G описується виразом (1):

$$G = \int_{\Delta\lambda} \Phi_{\lambda\delta}(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_m(\lambda) S_{\Pi}(\lambda) K_p d\lambda \quad (1)$$

де $\Phi_{\lambda\delta}(\lambda)$ – спектральний потік випромінювання на вході спектрокомпаратора; $\tau_o(\lambda)$ і $\tau_m(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання оптичного ослаблювача і монохроматора відповідно; $S_{\Pi}(\lambda)$ – спектральна чутливість приймача випромінювання; K_p – коефіцієнт підсилення підсилювально-реєструючого пристрою; $\Delta\lambda$ – смуга пропускання оптичного тракту, визначена смугою пропускання монохроматора.

Відмітимо, що спектральна характеристика компаратора визначається, перш за все, спектральною характеристикою ослаблювача і смугою пропускання монохроматора, якщо в якості приймачів випромінювання використовуються вимірювальні термопари або піроприймачі [2].

Позаяк монохроматор, приймач випромінювання і підсилювально-реєструючий пристрій є покупними виробами, характеристики яких відомі і підбираються згідно до умов, що висуваються до спектрокомпаратора (спектральний діапазон, ширина ділянки спектру, яка відокремлюється, і коефіцієнт перетворення), розглянемо більш детально роботу оптичного ослаблювача, який, в основному, і визначає метрологічні характеристики всього пристрою.

Оптичний ослаблювач

Розглянемо математичну модель ослаблювача.

Величина вхідної та вихідної апертури визначається радіусом сфери, яка використовується. Точного співвідношення між їх розмірами немає, але більшість дослідників вважають [6], що кращі метрологічні характеристики інтегруючої сфери забезпечуються в тому випадку, якщо радіус апертури складає 1/5 радіусу сфери.

Конструкція калібруючої діафрагми має велике значення, для точності ослаблювача. Ірисові та змінні прямокутні вимірювальні діафрагми більш компактні, але забезпечують похибку установки в межах 3...5%. Більш високу точність, а саме менше 0,01% забезпечують змінні діафрагми постійного перерізу, але габарити такої системи будуть більшими.

Нехай на вхідній апертурі першої інтегруючої сфери маємо освітленість $E_{\hat{A}\delta}$, тоді до сфери потрапляє потік $\Phi_{\hat{A}\delta}$:

$$\Phi_{\hat{A}\delta} = E_{\hat{A}\delta} \cdot A_{\hat{A}\delta} \quad (2)$$

де $A_{\hat{A}\delta}$ - площа вхідної апертури.

Потік, потрапивши в середину першої сфери, багаторазово відбивається від її стінок (коефіцієнт відбивання якої дорівнює ρ_1) і створює результуючу освітленість рівну [4]:

$$E_1 = \frac{E_{\hat{A}\delta} \cdot A_{\hat{A}\delta}}{A_1 \left[1 - \rho_1 \frac{A_1 - (A_{\hat{A}\delta} + A_K)}{A_1} \right]} \quad (3)$$

де A_1 - площа внутрішньої поверхні першої сфери; A_K - площа калібруючої діафрагми.

Потік, який пройшов через калібруючу діафрагму, буде дорівнювати:

$$\Phi_K = E_1 \cdot A_K \quad (4)$$

Потік, що потрапляє до другої сфери, багаторазово відбивається від її стінок (коефіцієнт відбивання якої - ρ_2) і створює результуючу освітленість E_2 :

$$E_2 = \frac{\Phi_K}{A_2} = \frac{E_1 \cdot A_K}{A_2 \left[1 - \rho_2 \frac{A_2 - (A_{\hat{A}\delta} + A_K)}{A_2} \right]} \quad (5)$$

де A_2 - площа внутрішньої поверхні другої сфери; $A_{\text{Вих}}$ - площа вихідної апертури.

Підставляючи (3) та (4) в (5), отримаємо:

$$E_2 = \frac{E_{\hat{A}\delta} \cdot A_{\hat{A}\delta} \cdot A_K}{A_1 \left[1 - \rho_1 \frac{A_1 - (A_{\hat{A}\delta} + A_K)}{A_1} \right] \cdot A_2 \left[1 - \rho_2 \frac{A_2 - (A_{\hat{A}\delta} + A_K)}{A_2} \right]} \quad (6)$$

Освітленість поверхні другої сфери одночасно є освітленістю вихідної апертури $E_{\hat{A}\delta}$. Саме така освітленість буде сформована на вході монохроматора, який знаходиться за ослаблювачем.

Тоді коефіцієнт ослаблення τ_0 може бути розрахований з використанням формул (2) та (6) наступним чином:

$$\tau_0 = \frac{A_{\hat{A}\delta} \cdot A_K}{A_1 \left[1 - \rho_1 \frac{A_1 - (A_{\hat{A}\delta} + A_K)}{A_1} \right] \cdot A_2 \left[1 - \rho_2 \frac{A_2 - (A_{\hat{A}\delta} + A_K)}{A_2} \right]} \quad (7)$$

Враховуючи те, що: $A_1 = 4\pi R_1^2$, $A_2 = 4\pi R_2^2$, $A_{\hat{A}\delta} = \pi R_{\hat{A}\delta}^2$, $A_K = \pi R_K^2$, та після певних перетворень вираз (7) переписеться у вигляді:

$$\tau_0 = \frac{\pi^2 R_{\hat{A}\delta}^2 \cdot R_K^2}{\left[4\pi R_1^2 - \rho_1 (4\pi R_1^2 - (4\pi R_{\hat{A}\delta}^2 + \pi R_K^2)) \right] \cdot \left[4\pi R_2^2 - \rho_2 (4\pi R_2^2 - (A_{\hat{A}\delta} + \pi R_K^2)) \right]} \quad (8)$$

Для отримання виразу, описуючого спектральну характеристику ослаблювача, необхідно інтегральні коефіцієнти відбивання ρ_1 і ρ_2 замінити їх спектральними аналогами $\rho_1(\lambda)$ і $\rho_2(\lambda)$.

Похибка оптичного ослаблювача

Якщо вважати величини в (8) незалежними, то відносна похибка коефіцієнта пропускання ослаблювача $\dot{\tau}_0 = \Delta\tau_0 / \tau_0$, обумовлена частковими похибками окремих факторів – ΔR_1 , ΔR_2 , $\Delta \rho_1$, $\Delta \rho_2$, $\Delta R_{\hat{A}\hat{\delta}}$, $\Delta R_{\hat{A}\hat{\delta}\hat{\delta}}$, $\Delta R_{\hat{E}}$, може бути описана виразом (9) [5]:

$$\dot{\tau}_0 = \frac{\Delta\tau_0}{\tau_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial\tau_0}{\partial R_1}\right)^2 \left(\frac{\Delta R_1}{\tau_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau_0}{\partial R_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta R_2}{\tau_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau_0}{\partial \rho_1}\right)^2 \left(\frac{\Delta \rho_1}{\tau_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau_0}{\partial \rho_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta \rho_2}{\tau_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau_0}{\partial R_{\hat{A}\hat{\delta}}}\right)^2 \left(\frac{\Delta R_{\hat{A}\hat{\delta}}}{\tau_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau_0}{\partial R_K}\right)^2 \left(\frac{\Delta R_K}{\tau_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau_0}{\partial A_{\hat{A}\hat{\delta}\hat{\delta}}}\right)^2 \left(\frac{\Delta A_{\hat{A}\hat{\delta}\hat{\delta}}}{\tau_0}\right)^2}, \quad (9)$$

де складовими є квадрати відносних первинних похибок з їх частковими похідними – коефіцієнтами впливу первинних похибок.

При численному аналізі ослаблювача скористаємось наступними спрощеннями: $A_1 = A_2$; $\rho_1 = \rho_2$; $A_{\hat{A}\hat{\delta}} = \frac{A_1}{5}$; $A_2 = 10A_{\hat{A}\hat{\delta}\hat{\delta}}$; $0 \leq A_{\hat{E}} \leq A_{\hat{A}\hat{\delta}}$.

Радіус вихідної апертури прийнято з урахуванням вхідної щілини монохроматора (МДР – 204).

Отже вихідні дані для розрахунку будуть:

$R_{ex}=0,024$; $R_1=0,12$ м; $R_2=0,12$ м; $R_K=0,024$; $A_{вих}=0,012$ м; $\rho_1=0,99$; $\rho_2=0,99$.

Числові значення коефіцієнтів впливу ослаблювача наведені в таблиці:

Таблиця 1. Коефіцієнти впливу первинних похибок.

Джерело похибки	Коефіцієнт впливу	Числове значення коефіцієнта впливу
Зміна радіусу кривизни першої інтегруючої сфери ΔR_1	$\frac{\partial\tau_0}{\partial R_1}$	-0.072 (м ⁻¹)
Зміна радіусу кривизни другої інтегруючої сфери ΔR_2	$\frac{\partial\tau_0}{\partial R_2}$	-0.057 (м ⁻¹)
Деградація внутрішнього покриття першої сфери $\Delta \rho_1$	$\frac{\partial\tau_0}{\partial \rho_1}$	-0.082

Продовження табл. 1.

Джерело похибки	Коефіцієнт впливу	Числове значення коефіцієнта впливу
Деградація внутрішнього покриття другої сфери $\Delta\rho_2$	$\frac{\partial\tau_0}{\partial\rho_2}$	0.063
Зміна радіусу вхідної апертури $\Delta R_{\hat{A}\hat{o}}$	$\frac{\partial\tau_0}{\partial R_{\hat{A}\hat{o}}}$	0.426 (м ⁻¹)
Зміна розміру вихідної апертури $\Delta A_{\hat{A}\hat{u}\hat{o}}$	$\frac{\partial\tau_0}{\partial A_{\hat{A}\hat{u}\hat{o}}}$	-6.894 10 ⁻³ (м ⁻¹)
Зміна радіусу калібруючої діафрагми $\Delta R_{\hat{E}}$	$\frac{\partial\tau_0}{\partial R_{\hat{K}}}$	1.642 (м ⁻¹)

Залежність відносної похибки ослаблювача від первинних помилок показані на рис. 2.

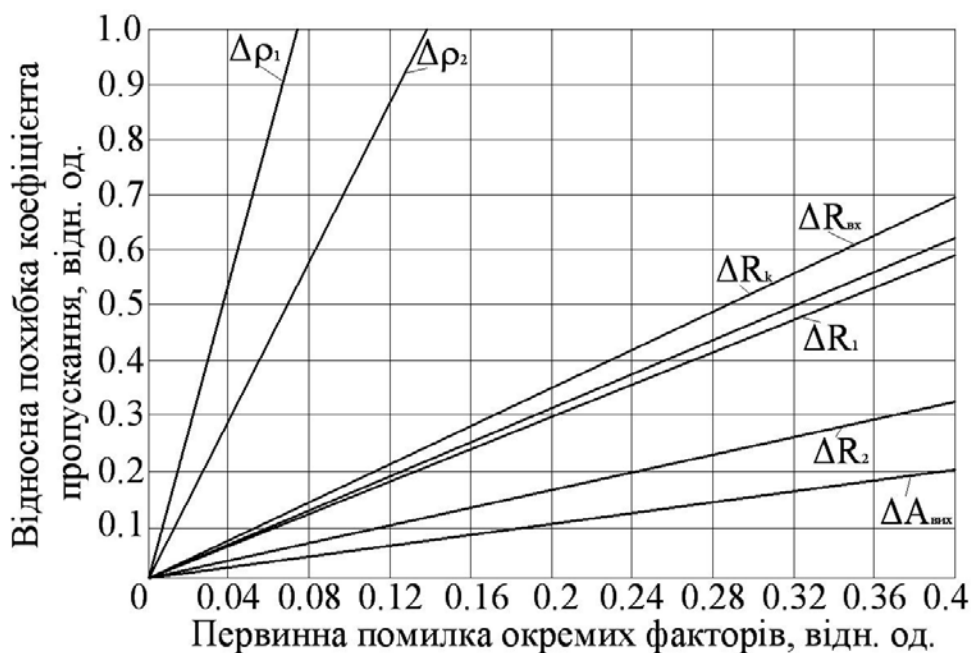


Рис. 2. Залежність відносної похибки ослаблювача від первинних помилок

З рисунку видно, що найбільший вклад в сумарну похибку вносить нестабільність внутрішнього покриття першої та другої інтегруючої сфери. Як показав аналіз літератури, це обумовлено деградацією матеріалу, його гігроскопічністю, запиленням та інше. Для кожного з покриттів, які використовують на практиці, ці фактори проявляються в різній мірі, але треба враховувати те, що навіть дов-

говічні традиційні на базі BaSO_4 та MgO покриття не можуть забезпечити стабільність краще ніж 0,05% в годину [7]. Найбільш перспективними в плані стабільності і добрих оптичних характеристик вважаються покриття із політетрафторетилену, який має коефіцієнт дифузного відбивання 0,99 в діапазоні 400 ... 1500 нм та 0,95 в діапазоні до 2500 нм, але на Україні їх використання досить обмежене.

Зокрема великий інтерес становить Spectralon [7], який має коефіцієнт дифузного відбивання $99 \pm 5\%$ в діапазоні 300 – 1800 нм. Його спектральні характеристики зображенні на рисунку 3, а характеристики стабільності наведені в табл. 2. Спектральна характеристика оптичного ослаблювача з використанням матеріалу Spectralon SRS-99 показана на рис. 3.

Зміна розмірів інтегруючих сфер, у відносних одиницях дає суттєвий вклад до загальної похибки, але по абсолютним величинам не перевищує сотих відсотків навіть при достатньо жорсткому температурному режимі. Асферичність та інші порушення форми інтегруючих сфер носять систематичний характер та враховуються при калібруванні.

Ще менший вплив дає нестабільність вихідної апертури і нею можна знехтувати.

Як було зазначено вище, вплив калібруючої діафрагми складає 3-5% для ірисової та прямокутної діафрагми, та менше 0,01% для змінної діафрагми постійного перетину.

Таблиця 2. Зміна спектральних характеристик Spectralon протягом часу.

Довжина хвилі, мкм	Коефіцієнт відбивання, відн. од.	Зміна коефіцієнт відбивання за		
		1 місяць	4 місяця	1.5 років
0.4	0.988	0.987	0.988	0.986
0.45	0.990	0.988	0.988	0.990
0.5	0.989	0.985	0.987	0.985
0.55	0.987	0.983	0.987	0.986
0.6	0.987	0.984	0.988	0.988
0.65	0.987	0.985	0.988	0.988

Залежність похибки коефіцієнта ослаблення від похибок головних елементів ослаблювача, з урахуванням їх реальних значень, показані на рис. 4 і можуть бути використані при оцінці точності оптичних ослаблювачів ще на стадії проектування.

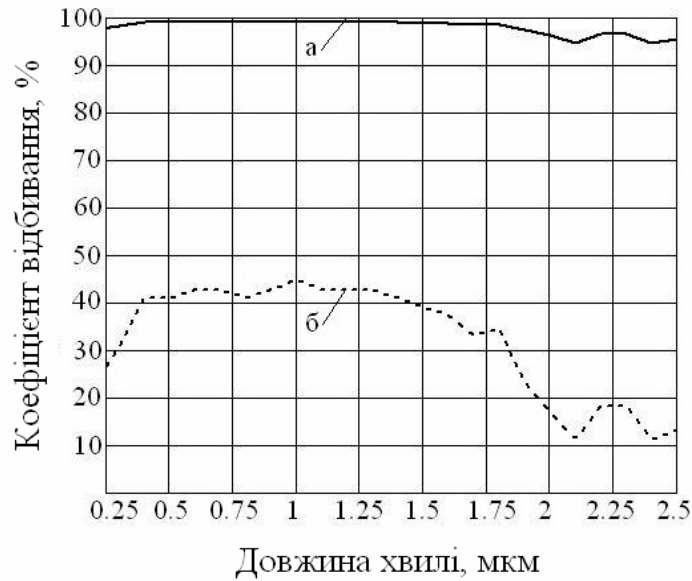


Рис. 3. Спектральна характеристика покриття Spectralon SRS-99 (а) та оптичного ослаблювача (б)

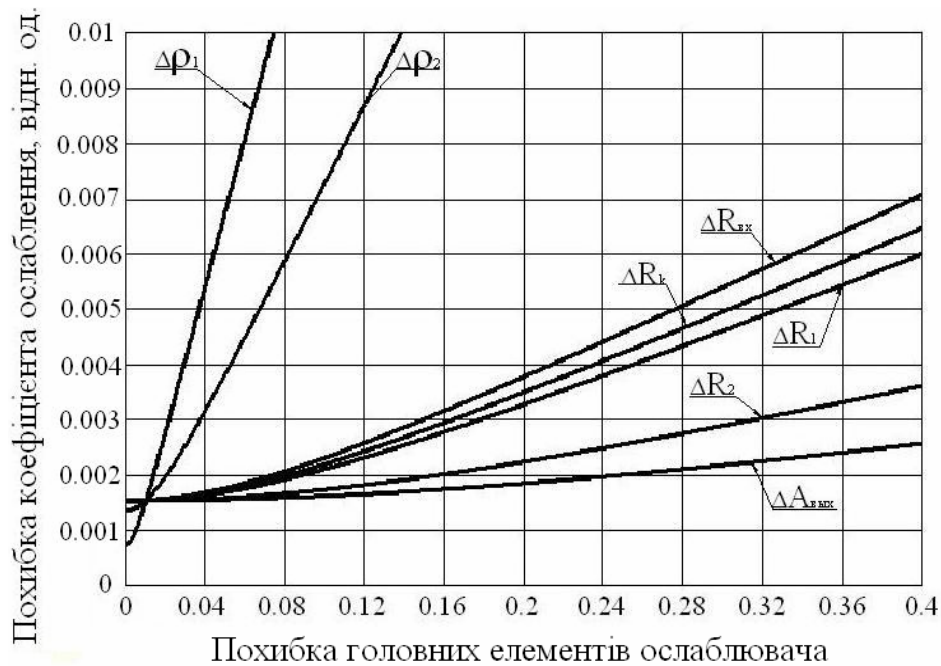


Рис. 4. Похибка коефіцієнту ослаблення залежно від нестабільності головних елементів ослаблювача

Елементна база спектрокомпаратора

В запропонованому спектрокомпараторі можуть використовуватись головні елементи, розглянуті в [2]. В тому числі, для калібрування оптико-електронних систем космічного базування [1] необхідні метрологічні характеристики забезпечують монохроматори МДР-204, МДР-206, вимірювальні приймачі випромінювання ФД-24К і РТН-12, прецизійний вольтметр В7-34А. В цьому випадку

похибка компарування не перевищує 0,2...0,3%, спектральний діапазон буде знаходитись в межах 0,35...2,2 мкм, а динамічний діапазон ослаблювача не менший $10^3...10^4$, що достатньо для вирішення більшості задач прецизійної радіометрії.

Висновок

Запропонована і проаналізована схема широкодіапазонного спектрокомпаратора для прецизійної радіометрії, який по своїм метрологічним характеристикам кращий відомих аналогів.

Показано, що при використанні сучасної елементної бази спектрокомпаратор забезпечує похибку компарування не вище 0,2...0,3%, а динамічний діапазон ослаблювача не менший $10^3...10^4$. Спектральний діапазон спектрокомпаратора не вужче 0,35...2,2 мкм.

Завдяки використанню оптичного ослаблювача на базі інтегруючих сфер, спектрокомпаратор не потребує точного позиціонування компаруючих випромінювачів відносно вхідної апертури.

В майбутньому пропонується розробка методики проектування запропонованого спектрокомпаратора з заданими параметрами і покращити його точність.

Отримані результати будуть корисні широкому колу спеціалістів в області прецизійної фотометрії і радіометрії.

Література

1. Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Міхеєнко Л.А. Стендова апаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2003. – №3 – С. 98 – 104.
2. Міхеєнко Л.А., Микитенко В.І. Методи, засоби та метрологічне забезпечення калібрування еталонних випромінювачів. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2008. – №6. – С. 94 – 99.
3. Воропай Е.С., Торпачев П.Л. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения. – Минск: Университетское, 1988. – 208 с.
4. Гуревич М.М. Фотометрия. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
5. Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
6. Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Міхеєнко Л.А. та ін. Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2005. – №4 – С. 106 – 114.
7. Journal «A Guide to Reflectance Coatings and Materials» <http://labsphere.com>

Михеєнко Л.А., Билинская И.Ю. Широкодіапазонний спектрокомпаратор

Предложена схема широкодиапазонного спектрокомпаратора на базе оригинального ослабителя оптического излучения для прецизионной радиометрии. Разработана модель спектрокомпаратора, проанализированы основные погрешности, данные рекомендации по их минимизации и выбору элементной базы.

Miheenko L.A., Bilinska I.Y. Wide-range spectrum-comparator

The chart of wide-range spectrum-comparator is offered on the base of original attenuator of optical radiation for precision radiometry. The model of spectrum-comparator is developed, basic error are analyzed, recommendations for their minimization and element base are described.

*Надійшло до редакції
10 червня 2009 року*